

令和 2 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05343

研究課題名(和文)重イオン衝突物理に関する基礎問題の研究

研究課題名(英文)Study of fundamental problems in heavy-ion collision physics

研究代表者

藤井 宏次 (Fujii, Hirotugu)

東京大学・大学院総合文化研究科・助教

研究者番号：10313173

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：クォーク・グルーオンプラズマをはじめとする有限温度密度QCDの性質を解明するために、超相対論的重イオン衝突の研究が世界的に進行中である。本課題では、重イオン衝突の物理に関連する基本的で重要な研究テーマとして、衝突初期段階の強いグルーオン場からの粒子生成、プラズマのハドロン化に伴う光生成、QCD臨界点に現れる臨界ゆらぎの測定についての理論的研究、そして有限密度格子QCDの懸案である符号問題に対して配位空間を複素拡張するアプローチという4つのテーマについて基礎研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質を構成している陽子・中性子の内部にあるクォーク・グルーオンが開放されたプラズマ状態は、初期宇宙や中性子星の内部に存在すると考えられている。それを支配する理論はQCDとして知られており、また、そのようなプラズマ状態を大型加速器を用いる高エネルギー重イオン実験で再現する研究が世界な協力研究として進行している。しかし、クォーク・グルーオンが強く結合するQCDの理論内容を定量的に評価することは極めて難しく、必要な数値計算や解析を多くの研究者が協力して行っている。本研究は重イオン衝突実験の観測結果に照らしてQCDの理解を深めるための研究の一貫として行われている。

研究成果の概要(英文)：In order to provide deeper understanding of QCD system at finite temperatures and densities, such as quark-gluon plasma phase, study of ultra-relativistic heavy-ion collision physics has been globally underway. In this project, as fundamental and important problems in this research area, we investigate the following four related subjects: particle production from the strong gluon field at early stage of the collisions, photon production mechanism in hadronization stage from the plasma, fluctuation observables related to the QCD critical point, and the field-complexification approach to the sign problem of finite density QCD.

研究分野：原子核理論

キーワード：量子色力学 クォーク・グルーオン プラズマ 高エネルギー重イオン衝突 相転移 統計力学 符号問題

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

RHIC と LHC での高エネルギー重イオン衝突実験によって、強い集団性をもつクォーク・グルーオン多体系（プラズマ）が生成されるに至り、近年では広範な測定結果が提供される段階になった。そして、実験研究の目標は衝突エネルギーや核種を変化させて様々な測定量を網羅することによって、有限温度 QCD の一貫した理解に結びつける方向に移ってきた。一方で、理論研究の進展も著しく、ジェット粒子との結合を含む新しい段階の流体モデルシミュレーション開発、有限温度格子 QCD の数値手法の精緻化などの研究が進んでいる。この状況の下で、衝突実験の観測量と有限温度密度 QCD 物理との橋渡しをする上で、衝突事象初期に出現する強いグルーオン場配位から局所熱平衡化にいたる物理機構の解明、期待される QCD 臨界点と実験観測量との関連、また特に QCD 相図の全容解明を目指す有限密度条件に適用できる QCD シミュレーション手法の開発という基本的な課題への挑戦が今まさに重要性を増している。

2. 研究の目的

本研究課題では、重イオン衝突実験で得られる測定量から有限温度 QCD の理解を引き出す上で重要かつ挑戦的な問題として、次の課題に取り組む。(1) 衝突初期の熱化に関連する物理的機構の解明、(2) ハドロニ化に伴う新しい光子生成の評価、(3) 有限温度密度相図上に存在が期待される臨界点近傍の非平衡現象と観測量ゆらぎとの関連、(4) 有限密度条件の QCD に現れる符号問題である。

3. 研究の方法

(1) カラーグラス凝縮有効理論によると原子核衝突直後に強いグルーオン場の生成が予想される。この配位を初期条件にした時間発展数値シミュレーションを開発して熱化過程における粒子生成の役割を明らかにする。また、強いグルーオン場からの重たいクォーク対生成を強いグルーオン場を考慮した摂動論を用いて評価して初期状態の情報を探る。

(2) 重イオン衝突実験では、初期のプラズマからの熱放射と解釈される光子分布の増加が観測されると同時に、終状態効果と解釈できる強い集団的な異方性流れを持つことが発見されて、その起源が問題となっている。本研究ではハドロニ化に伴う光生成過程の寄与を考え、観測結果と比較する。

(3) 一次相転移線の端点として予想される QCD 臨界点について、付随する臨界モードであるバリオンゆらぎの時間発展をランジュバン方程式を用いて定式化し、観測される感受率の振舞いを計算する。また、カイラル凝縮ゆらぎの非臨界モードとのモード結合を含む形に拡張することによって、事象の非平衡性とモード結合が、バリオン数密度ゆらぎに及ぼす影響を定量化する。

(4) 有限化学ポテンシャルでは QCD 作用が複素数になるために統計平均の評価にモンテカルロ法を直接適用できないという符号問題が知られている。その解決可能性として、変数を複素数に拡張する「複素ランジュバン方程式」と「Lefschetz thimble 積分」の2つの方法を、符号問題をもつフェルミオン系の模型に適用して、手法の正当性と実用可能性をそれぞれ検討する。

4. 研究成果

(1) 高エネルギー重イオン衝突事象では、入射原子核が通過した背後に強いグルーオン場が生成することが想定されている。このグルーオン場を古典場として近似し、それに結合するグルーオンとクォークの量子場を自己無撞着に扱う枠組みで古典場の崩壊と粒子生成を、大学院生の田屋が中心となって、研究した。ビーム方向にカラー電場のチューブ配位を想定して、数値計算を行ったところ、1 fm/c 程度の時間スケールで、クォーク生成とグルーオン生成と同程度の収量で生じ、非等方性を表す縦横圧力の比の値が初期条件で -1 であった値から $1/2$ 程度にまで緩和することが分かった。簡略化した状況設定での試験計算だが、衝突事象の初期時間発展において古典場からの粒子生成を非摂動的に扱うことの重要性を強く示唆している。また、初期のグルーオン場に鋭敏な観測量として、重いクォーク対の生成量を運動量とラピディティの関数として定量的に評価し、LHC で測定された振舞いと矛盾がないことを、渡邊氏との共同研究で示した。

(2) 電磁プラズマ中の電子と陽子が束縛して中性化する際に、余分なエネルギーが光として放出される過程が、再結合放射として知られている。一方、重イオン衝突の物理では、観測されたハドロニ分布の一つの特徴をよく説明できるモデルとして、局所熱分布したクォーク対が再結合して中間子を形成する再結合モデルがある。このモデルは一見、エネルギー運動量保存とエントロピー増大の法則を満たさないように見えるが、多粒子の環境の中で生じる過程であるので注意が必要である。我々は、この点について再結合モデルを改良する一つの過程として、光子放射を伴うハドロニ化過程の存在を指摘した。この機構で生成する光子は、クォーク分布の持つ動径方向膨張の効果と非中心衝突を反映する異方的運動量分布を自然と受け継いでいる

と期待される。近年、測定された光子の運動量分布が、高い有効温度と強い異方性集団流れを同時に持っていることが注目されているが、数値計算を行ってみたところ、クォーク再結合に伴って生成する光子の分布がこの2つの特徴を同時に持つことが分かった。

(3) 実験で測定される核子分布の二次ゆらぎは、衝突事象の初期状態から終状態にいたるまでの時間発展の影響を含む量なので、温度と化学ポテンシャルを指定して理論的に計算される感受率と比較するときには注意を要する。また、バリオン数密度は保存量であるため、衝突系全体ではゆらぎを持たず、部分系を見たときに初めて特徴的なゆらぎの振舞いを示す。我々は、大阪大学グループとの共同研究で、ラピディティ相関ゆらぎではラピディティ間隔が長いほど事象初期の影響が残ることに着目して、相関ゆらぎがラピディティについて非単調に振る舞うことが、衝突系が臨界点を經由して時間発展したことの指標に成り得ることを指摘した。近年、関連する実験結果の更新もあり、注目される観測量である。

また、ダイナミカルに時間発展する衝突事象では、有効自由度としてバリオン数密度ゆらぎだけに簡略化して時間発展を記述することが正当化できない可能性が大いにある。そこで、QCD相転移に重要な自由度の代表として、カイラル凝縮のゆらぎを取り入れて、バリオン数密度ゆらぎとのモード結合を考慮したランジュバン方程式を、上智大学グループと共同で、定式化した。ひきつづき、系の時間発展の速さとモード結合の影響との関連を1次元簡略模型を用いて解析的数値的に調べている。

(4) 有限バリオン化学ポテンシャル条件の下では、フェルミオン行列式を含むQCDの有効作用が複素数値を取ることに、分配関数の評価にモンテカルロ法を直接適用できないという「符号問題」が長い間知られている。この問題に対する新しい試みとして、力学変数を複素数に拡張するアプローチが、我々のグループを含め国内外で進行している。我々は、QCD同様の符号問題を持つモデルとして1次元Thirringモデルを採り上げて、モデルのシンプル構造の解析と、数値計算を行い、フェルミオン行列式の持つゼロ点で連結した複数のシンプルの寄与の相殺が有限密度一次相転移の再現に重要であることを指摘していた。複素ランジュバン方程式(CLE)の方法では、複素空間に広がるアンサンプルがゼロ点に重なる場合に、理論の分配関数とCLEが評価する分配関数の等価性が示せないことが知られているが、我々は、CLEの生成するアンサンプルを用いた再荷重の方法でゼロ点の問題を避けることを試み、このモデルでは、自由度の増大にしたがって必要とされるアンサンプルのサイズが指数関数的に大きくなることを確認した。

(5) カイラルランダム行列模型に対して、CLEの方法とシンプル積分の方法を適用した。ランダム行列理論にCLE法を適用した場合、結果は厳密解と異なり、行列サイズとともにむしろクエンチ近似の結果に漸近することが指摘されていた。我々はCLE法のアンサンプルを用いて、行列式の固有値分布を数値解析して、CLE法が適用できない領域がクエンチ理論の凝縮相に相当していることを確認した。凝縮相の領域はクォーク質量がゼロに近づくに従って温度-化学ポテンシャル平面の広い領域が広がるが、QCDの物理的な設定ではクォーク質量が小さいので、CLE法の適応領域が限定的な領域になることが分かった。また、一般化シンプル法を適用した解析では、符号問題を改善するために配位空間を複素空間にフローさせて変形する。数値計算の結果、フローに伴って重み関数の振舞いは改善するが、アンサンプルの局在化(エルゴード性の破れ)が生じることが示唆された。これはThirring模型では知られていたことである。この点を改善するために、異なるフローパラメータ毎に複数の系を準備して交換モンテカルロ実行するアルゴリズムを、行列模型に対して実装しているところである。

(6) 格子上のSchwinger-Keldysh形式の定式化

量子場の格子シミュレーションでは、温度効果を表す虚時間軸に時間軸を採用することと、実時間振幅が位相因子であるという符号問題のために、実装化は困難な課題であると考えられてきた。しかし、シンプル積分法の適用によって経路積分の収束性を改善することが試みられている。我々は、実時間格子シミュレーションで必要になるSchwinger-Keldysh形式の表式を、ボソン・フェルミオン系について頭書き下し、自由伝播関数の表式や格子化に伴うユニタリ性の破れの程度を明らかにした。将来、輸送係数の実時間計算を用いた評価に繋がる成果と考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Miki Sakaida, Masayuki Asakawa, Hirotsugu Fujii, Masakiyo Kitazawa	4. 巻 95
2. 論文標題 Dynamical evolution of critical fluctuations and its observation in heavy ion collisions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 64905
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.95.064905	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Hirotsugu	4. 巻 208
2. 論文標題 Small-x saturation in forward hadronic interactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 EPJ Web of Conferences	6. 最初と最後の頁 12001 ~ 12001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201920812001	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Hirotsugu Fujii, Hiroki Hoshina, Yoshio Kikukawa	4. 巻 LATTICE2019
2. 論文標題 Schwinger-Keldysh formalism of Lattice Gauge Theories	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 190
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Fujii Hirotsugu, Itakura Kazunori, Nonaka Chiho	4. 巻 967
2. 論文標題 Photon emission at hadronization	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 704 ~ 707
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2017.06.045	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 H. Fujii
2. 発表標題 Small-x saturation in forward hadronic interactions
3. 学会等名 20th Int'l symposium on very high energy cosmic ray interactions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Fujii
2. 発表標題 Parton saturation in AA, pA and eA
3. 学会等名 日米合同原子核物理部門物理学会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 板倉数記、野中千穂、藤井宏次
2. 発表標題 クォーク再結合による光生成
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 保科宏樹、藤井宏次、菊川芳夫
2. 発表標題 格子ゲージ理論におけるSchwinger-Keldysh形式の定式化
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirotugu Fujii
2. 発表標題 The Reweighting Method in Complex Langevin Approach
3. 学会等名 ECT* Workshop "Simulating QCD on Lefschetz thimbles"
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hirotugu Fujii
2. 発表標題 Complex Langevin and Lefschetz thimble; application to fermionic models
3. 学会等名 Toward real-time simulations of quantum field theories and solution of the sign problem (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Fujii, S. Kamata and Y. Kikukawa
2. 発表標題 Complex Langevin approach to fermionic toy models at finite chemical potential
3. 学会等名 SIGN 2017: International Workshop on the Sign Problem in QCD and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H.Fujii, S. Kamata and Y. Kikukawa
2. 発表標題 Complexification approach to the sign problem in chiral models
3. 学会等名 第26回超相対論の原子核衝突に関する国際会議 (QuarkMatter 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 K. Watanabe and H. Fujii
2. 発表標題 Heavy quark production in pA collisions in the CGC framework - update and decay leptons -
3. 学会等名 第26回超相対論的原子核衝突に関する国際会議 (QuarkMatter 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Sakaida, M. Asakawa, H. Fujii and M. Kitazawa
2. 発表標題 Dynamical evolution of critical fluctuation and its observation
3. 学会等名 第26回超相対論的原子核衝突に関する国際会議 (QuarkMatter 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Taya and H. Fujii
2. 発表標題 Quark and Gluon Production from an Expanding Strong Color Electric Flux Tube
3. 学会等名 第26回超相対論的原子核衝突に関する国際会議 (QuarkMatter 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----